

ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ

PECULIARITIES OF ROLLING IN CALIBER CONICAL ROLL

Буркин С.П., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

Theoretically and experimentally analyzed rolling of sections and reduction rolling in calibers four conical rollers. Describe the kinematics of metal flow during rolling strips in square and round calibers. Defined power parameters of rolling, corners curling strips rolling in conical rolls. The comparison of experimental and calculated data. Keywords: rolling, tapered rollers, multi-rollers calibers power parameters, torsion bars.

Многовалковые калибры в сравнении с двухвалковыми обладают рядом бесспорных достоинств [1], в частности позволяют увеличить жесткость прокатных клетей и, следовательно, точность размеров проката, снизить уширение и поднять вытяжную способность калибров, изменить схему напряженного состояния в очаге деформации, приблизив ее к всестороннему сжатию, и, благодаря этому, повысить пластичность прокатываемого металла. Широкому внедрению технологий прокатки в многовалковых калибрах препятствует сложность конструкций клетей и наличие достаточно длинных трансмиссий привода всех валков от одного двигателя. Конструкция и обслуживание клетей несколько упрощаются при установке консольных грибовидных валков, но это естественно снижает жесткость валкового узла. В трансмиссиях привода возникают возрастающие по мере износа люфты, порождающие асимметрию зоны обжатия и изгиб конца полосы в начальный момент прокатки. Проблемы упрощения конструкций клетей с многовалковыми калибрами и устранения люфтов успешно решены установкой индивидуального гидропривода валков [2, 3]. Для увеличения точности прокатки целесообразно использовать многовалковые калибры конических валков. Схемы замыкания квадратного и круглого калибров для четырехвалковой прокатки в системе круг-квадрат-круг показаны на рис.1. Все валки установлены консольно в индивидуальных подушках и могут смещаться в осевом направлении (рис.1а), изменяя размеры квадратного калибра, который при этом остается замкнутым. Раскрытие торцевых зазоров в этом случае определяется лишь упругой деформацией подушек и корпуса клетки. Несомненным достоинством калибров, образованных бочками конических валков, является уменьшение поперечной составляющей полного давления металла на валки. При прокатке, кроме поперечной, возникает продольная составляющая равная $P/\sqrt{2}$, где P - сила полного давления металла на валок, и дополнительный изгибающий момент от силы параллельной оси валка. Эти дополнительные воздействия воспринимаются упорными подшипниками валкового узла. При рациональном конструировании подушек удастся несколько поднять жесткость клетки в сравнении с

аналогичными клетями, в которых многовалковый калибр образован цилиндрическими валками.

Применение калибров, выполненных на конических бочках и образованных гладкими коническими бочками, известно сравнительно давно. Например, двухвалковый круглый калибр, образованный ручьями на конических валках, описан в А.с. СССР №1202645. Калибр применен с целью повышения точности размеров и качества поверхности круглого профиля. Известны также (например, А.с. СССР №1251987) многовалковые калибры, образованные гладкими коническими бочками валков, применяемые с целью оперативного изменения размеров калибра и расширения, за счет этого, технологических возможностей оборудования.

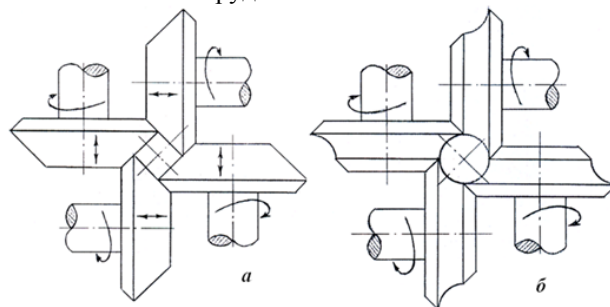


Рис. 1. Схемы формирования квадратного (а) и круглого (б) калибра коническими валками

Важной особенностью прокатки в калибрах конических валков является появление осевого крутящего момента, действующего на полосу и приводящего либо к вращению входящего конца и существенному скручиванию полосы в зоне обжатия (при последовательной прокатке), либо к дополнительным тангенциальным напряжениям в очаге деформации (при непрерывной прокатке). При скручивании полос формируется спиральная текстура проката, повышающая ударную вязкость металла (установлено экспериментально при прокатке конструкционных легированных сталей). Дополнительные тангенциальные касательные напряжения снижают на 15...20% давление металла на валки.

В настоящей работе рассмотрена кинематика и силовые параметры прокатки в четырехвалковом калибре по схеме круг-квадрат, где кручение полосы допустимо и полезно с точки зрения повышения механических характеристик горячекатаных полос. В схемах квадрат-круг и

квадрат-квадрат кручение недопустимо и полоса на входе удерживается от вращения либо предыдущей клетью, либо проводковым устройством.

До настоящего времени процесс прокатки в многовалковых калибрах конических валков не исследовался ни экспериментально, ни теоретически. Адекватность приведенной здесь математической модели прокатки по схеме круг-квадрат подтверждена опытными данными, полученными при горячей прокатке на лабораторной прокатной установке с четырехвалковыми калибрами, оснащенной датчиками усилий и скоростей, подключаемыми к автоматической системе сбора, обработки и хранения опытной информации с оригинальным программным обеспечением.

Для теоретического анализа процесса четырехвалковой прокатки по схеме круг-квадрат приняты следующие допущения и гипотезы:

- сопротивление деформации принимается постоянным в очаге деформации и равным среднему значению, соответствующему средним степени и скорости деформации; деформационный разогрев и потери выделившегося тепла теплопроводностью через валки не учитываются;
- σ_s принимается при температуре входа полосы в валки;

- контактное трение постоянно на всех контактных поверхностях и определено законом Зибеля $\tau = \psi \cdot \tau_s$, где ψ - коэффициент трения; τ_s - среднее значение сопротивления деформации сдвига; зоны прилипания на контакте отсутствуют;

- внеконтактная деформация на входе и выходе очага деформации не учитывается;
- форма границы контактной поверхности на конических валках принята параболической и симметричной относительно оси прокатки;

- изменение диаметра описанной вокруг поперечного сечения полосы в зоне обжатия описывается линейной функцией, а интенсивность этого изменения в зависимости от вытяжки получена экспериментально при прокатке с высоким коэффициентом трения (обезжиренная замеленная поверхность образца и обезжиренные рабочие поверхности валков);
- на контактных поверхностях выделяются зоны опережения и отставания, разделенные нейтральной (критической) линией, все точки полосы на этой линии имеют скорости равные окружным скоростям валков в соответствующих точках рабочих поверхностей валков;

- под катающим диаметром валка $D_k = 2R_k$ понимается диаметр, окружная скорость точек на котором совпадает со скоростью выхода полосы из валков;
- мощность прокатки представлена суммой мощности внутренних сил (мощности деформации) и мощности продольной составляющей трения в зоне опережения;
- угол скручивания полосы в зоне обжатия определен условным поворотом критической

линии, при котором достигается равенство моментов кручения от напряжений трения в зонах опережения и отставания;

- скручивание полосы локализуется лишь в зоне обжатия и не распространяется в выходящую из валков часть полосы;

- к выходящему концу полосы не прикладывается внешний крутящий момент, препятствующий или способствующий скручиванию полосы;

- прокатка осуществляется без напряжений и осевых подпоров;

- условие захвата полосы валками не анализируется.

Расчетная схема зоны обжатия круглой полосы в квадратном многовалковом калибре приведена на рис. 2.

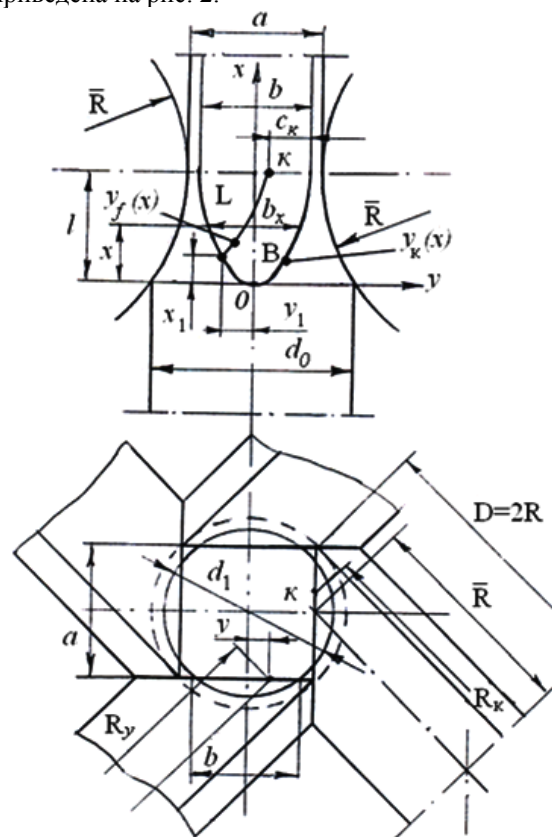


Рис. 2. Расчетная схема очага деформации при прокатке круглой в сечении полосы в квадратном калибре конических валков

Заготовка диаметром сечения d_0 прокатывается в замкнутом квадратном калибре со стороной a . Поскольку в общем случае калибр оказывается незаполненным, ширина контакта на выходе задана величиной b . Граница проекции контактной поверхности на координатную плоскость $(x-y)$ задана функцией $y_k(x)$, а критическая линия – функцией $y_f(x)$.

Функция $y_k(x)$ может быть представлена параболой $x = \frac{4l}{b^2} y^2$, где l – длина очага деформации, представляемая выражением

$l = \sqrt{(d_0 - a) \cdot \bar{R}}$; $\bar{R} = R - \frac{a}{2\sqrt{2}}$ - средний радиус валка в калибре.

Отсюда следует $y = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{x}{l}}$ и

$b_x = b \sqrt{\frac{x}{l}}$ - текущая ширина контакта.

Форма свободной поверхности считается цилиндрической и определяется радиусом $d_1/2$. Площадь поперечного сечения прокатанной полосы

$$S_1 = ab + \frac{\beta}{2} d_1^2, \quad \text{где} \quad \beta = \frac{\pi}{2} - 2\alpha;$$

$\alpha = \arctg \frac{b}{a}$, рад - центральные углы сечения,

опирающиеся соответственно на свободную и половину контактной поверхностей.

Вытяжка при прокатке по рассматриваемой схеме круг-квадрат

$$\lambda = \frac{\pi d_0^2}{4 \left(ab + \frac{\beta}{2} d_1^2 \right)}, \quad (1)$$

а степень деформации в логарифмическом представлении $\varepsilon = \ln \lambda$.

Диаметр описанной окружности d_1 при заданных исходных размерах полосы и калибра находится из уравнения равенства вытяжек, определяемых из геометрических соотношений в соответствии с рис.2 и из опытных данных по

величине степени заполнения калибра $\delta = \frac{d_1}{a\sqrt{2}}$,

представленной в зависимости от λ линейной функцией $\delta = 0,435 + 0,335 \lambda$ при квадрате смешанной корреляции $R^2 = 0,976$, где

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}{\sum \delta_i^2 - \left(\frac{\sum \delta_i}{n} \right)^2}; \quad \delta_i - i\text{-е опытное}$$

значение; $\hat{\delta}_i$ - i -е значение аппроксимации; n - объём выборки.

Из аппроксимирующей функции можно записать выражение для приблизительного расчета вытяжки

$$\lambda \cong 2,1 \frac{d_1}{a} - 1,3 \quad (2)$$

Диаметр d_1 определяется численно из выражений (1) и (2).

Изменение диаметра описанной окружности вокруг текущего сечения полосы в зоне обжатия представлено в виде

$$d_x = d_0 - \frac{x}{l} (d_0 - d_1).$$

В этом случае площадь текущего поперечного сечения:

$$S_x = ab \sqrt{\frac{x}{l}} + \frac{\beta_x}{2} d_x^2, \quad \text{где} \quad \beta_x = \frac{\pi}{2} - 2\alpha_x;$$

$$\alpha_x = \arctg \frac{b_x}{a} = \arctg \left(\frac{b}{a} \sqrt{\frac{x}{l}} \right).$$

Здесь $\beta_{x|l} = \beta$ и $\alpha_{x|l} = \alpha$.

Катающий диаметр является важным параметром прокатки, знание которого необходимо для скоростной настройки непрерывных групп клеток и блоков. Величина катающего диаметра определяется положением точки κ (рис.2), заданным координатой

$$c_\kappa = (R - R_\kappa) \sqrt{2} - \frac{a-b}{2}.$$

Из анализа опытных данных по положению критической линии на контактной поверхности установлена возможность ее аппроксимации уравнением

$$x = \frac{4l}{b^2} (y + c_\kappa)^2. \quad (3)$$

Катающий диаметр может быть представлен безразмерным параметром

$$\eta = \frac{D_\kappa - D_1}{D - D_1} = 1 - \frac{D - D_\kappa}{a\sqrt{2}}, \quad \text{где}$$

$$D_1 = D - \frac{2a}{\sqrt{2}} - \text{минимальный диаметр валка в}$$

калибре. В этом случае $c_\kappa = a(1 - \eta) - \frac{a-b}{2}$.

При $D_\kappa = \bar{D}$ $\eta = 0,5$; при $D_\kappa = D$ $\eta = 1$; при $D_\kappa = D_1$ $\eta = 0$.

Проверка справедливости описания формы критической линии, разделяющей зоны опережения и отставания, уравнением параболы (3), смещенной на величину c_κ , осуществляется численным методом по условию совпадения продольных составляющих скоростей полосы и валков. В точках критической линии скорости в направлении прокатки полосы и валков совпадают. При численном анализе катающий диаметр принимался равным среднему $D_\kappa = \bar{D}$ и $c_\kappa = b/2$.

Если задана частота вращения валков n , об/мин, то окружная скорость валка на катающем

диаметре равна $V'_1 = \frac{\pi \bar{D} n}{60} = \frac{\pi \bar{R} n}{30}$.

Продольная составляющая окружной скорости валка и скорость полюсы на выходе из очага

$$\text{деформации } V_1 = \frac{\sqrt{2} \pi \bar{R} n}{60}.$$

Условие постоянства секундных объемов $V_1 S_1 = V_x S_x$ позволяет определить продольную (вдоль направления прокатки) скорость сечения полосы, заданного координатой x $V_x = V_1 \frac{S_1}{S_x}$.

Окружная скорость валков в зоне обжатия зависит от координаты y и определяется выражением

$$V'_x = \frac{\pi n}{30} \left(R - \frac{a}{2\sqrt{2}} + \frac{a}{b\sqrt{2}} y \right) = \frac{\pi n}{30} \left[R - \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,5 - \frac{y}{b} \right) \right], \text{ а}$$

продольная составляющая этой скорости

$$V = \frac{\sqrt{2} n \pi}{60} \left[R - \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,5 - \frac{y}{b} \right) \right].$$

Касательная к рабочей поверхности валка составляющая скорости движения точек

$$\text{поверхности полосы } V_m = \frac{V_x}{\cos \alpha_x}, \text{ где}$$

$$\alpha_x = \arcsin \frac{l - x}{R_y};$$

$$R_y = \bar{R} + \frac{y}{\sqrt{2}} = R - \frac{a}{2\sqrt{2}} + \frac{y}{\sqrt{2}}.$$

Координаты точек нейтральной линии на контактной поверхности находятся численно из уравнения $V = V_m$.

Критическая линия $y_f(x)$, в дальнейшем представляемая смещенной параболой

$$y_f = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{x}{l}} - (R - R_k) \sqrt{2} + \frac{a - b}{2},$$

разделяет контактную поверхность заготовки с каждым из валков на зону отставания B (рис.2) и зону опережения L , на которых действуют напряжения трения τ , противонаправленные скоростям скольжения. Угол отклонения векторов τ от вектора скорости движения полосы V равен углу конусности валков и в данном случае равен 45° . Процесс прокатки осуществляется за счет составляющей трения τ_x в зоне отставания.

Трение τ_x в зоне опережения препятствует входу полосы в валки. Компонента трения τ_y в зоне B создает крутящий момент, способствующий скручиванию заготовки в очаге деформации,

поскольку векторы τ_y во всех четырех зонах отставания создают однонаправленный крутящий момент, благодаря использованной схеме сопряжения валков при формировании калибра (см. рис.1).

Из уравнения $V = V_m$ невозможно определить катающий диаметр валков, то есть положение точки k на рис.2. Поэтому использована процедура определения энергосиловых параметров

прокатки. Полная мощность прокатки N_1 может быть найдена как произведение момента продольной составляющей сил трения в зонах отставания на угловую скорость валков. С другой стороны, полная мощность прокатки определяется суммированием мощностей внутренних сил $N_{вн}$ и сил трения в зоне опережения $N_{тр}$, то есть

$$N_2 = N_{вн} + N_{тр}. \text{ Из условия равенства}$$

$N_1 = N_2$ численным методом определяется катающий диаметр в рамках допущения, что критическая линия при любом смещении D_k от \bar{D} остается параболической. В численной

процедуре определения D_k осуществлялся поиск величины η , при которой выполняется равенство

$$N_1 = N_2. \text{ Зная параметр } \eta, \text{ катающий диаметр}$$

$$\text{можно найти по формуле:}$$

$$D_k = D - \sqrt{2} a (1 - \eta).$$

Первое приближение параметра η находилось из априорной информации. Возможности экспериментальной установки ограничивались варьированием вытяжки, поэтому приближение по η находилось из функции $\eta = \eta(\lambda)$, определенной лишь при относительном диаметре валка $A = \bar{D}/a = 6,5$.

Эмпирическая зависимость $\eta = \eta(\lambda)$ аппроксимирована полиномом

$$\eta = 10,97 \lambda^3 - 47,74 \lambda^2 + 17,60 \lambda - 30,78.$$

Область интегрирования зоны отставания разделена сечением, заданным точкой пересечения (x_1, y_1) кривых $y_k(x)$ и $y_f(x)$ (см. рис.2)

$$x_1 = \frac{4l}{b^2} y_1^2, \text{ где } y_1 = \frac{a - b}{4} - (R - R_k) \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Момент прокатки, создаваемый силами трения в зоне отставания, представлен выражением:

$$M_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \Psi \sigma_s \left(\int_0^{y_k} \int_{x_1}^{y_k} R_y \cos \gamma_k dy dx + \int_{x_1}^{y_k} \int_{y_f}^{y_k} R_y \cos \gamma_x dy dx \right),$$

$$\text{где } \gamma_x = \arcsin \frac{l-x}{R_y}; \quad R_y = \bar{R} + \frac{y}{\sqrt{2}};$$

$$y_f = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{x}{l}} - a(1-\eta) + \frac{a-b}{2}.$$

При нахождении σ_s в условиях горячей деформации принимается средняя за процесс температура прокатки; степень деформации оценивается величиной $\varepsilon = \ln \lambda$, а скорость деформации принимается средней в зоне обжатия $\xi = \varepsilon/\tau$, где τ - время перехода материальных частиц металла полосы от входа до выхода из зоны

$$\text{обжатия } \tau = \int_0^l \frac{dx}{V_x}. \quad \text{Здесь } V_x = V_1 \frac{S_1}{S_x},$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}\pi R_k n}{60}.$$

Поскольку до нахождения величины η R_k не известен и, следовательно, V_1 может быть найдена последовательными приближениями, первые из которых находятся при $R_k = \bar{R}$.

Мощность прокатки $N_1 = M_{\text{пр}} \cdot \omega$, где $\omega = \pi n/30$ - угловая скорость валков. Мощность прокатки N_2 , представляемая как сумма $N_{\text{вн}}$ и $N_{\text{тр}}$ в зоне опережения, в случае усреднения параметров по очагу деформации записывается следующим образом:

$$N_2 = N_{\text{вн}} + N_{\text{тр}} = \int_v H T dv + \frac{\sqrt{2}\Psi\tau}{2} \int_{x_1}^{y_f} \int_{y_k}^{y_k} R_y \cos \gamma_x dy dx.$$

Интенсивность скоростей деформаций сдвига H оценивается величиной $\sqrt{3}\xi$, а интенсивность касательных напряжений по условию текучести Мизеса $T = \tau_s = \sigma_s/\sqrt{3}$. Объемный интеграл в этом случае заменяется объемом, определяемым численно из выражения:

$$v = \int_0^l \left[ab \sqrt{\frac{x}{l}} + \left(\frac{\pi}{4} - \arctg \frac{b}{a} \sqrt{\frac{x}{l}} \right) d_x^2 \right] dx, \quad \text{где}$$

$$d_x = d_0 - \frac{x}{l}(d_0 - d_1). \quad \text{Таким образом,}$$

$$N_{\text{вн}} = v \cdot \xi \cdot \sigma_s.$$

Из уравнения $N_1 = N_2$ устанавливаются значения относительного катающего диаметра η в зависимости от вытяжки λ , коэффициента трения

Ψ (по Зибелю) и относительного диаметра валков A .

После определения момента прокатки $M_{\text{пр}}$ при выполнении условия $N_1 = N_2$ расчет полного давления металла на валки проводится с допущением, что центр приложения равнодействующей полного давления совмещен с центром тяжести контактной поверхности, координаты которого в выбранной системе координат равны: $y_0 = 0$; $x_0 = l^3 \sqrt{1/4} \cong 0,63 l$.

Коэффициент плеча приложения равнодействующей полного давления металла на

$$\text{валки } \Psi_l = \frac{l-x_0}{l} \cong 0,37.$$

Полное давление металла на валки (усилие прокатки) $P = \frac{M_{\text{пр}}}{l \cdot \Psi_l}$, а его радиальная составляющая

$$P_r = \frac{\sqrt{2}}{2} P \cong \frac{2,7 M_{\text{пр}}}{\sqrt{(d_0 - a) \left(D - \frac{a}{\sqrt{2}} \right)}}. \quad \text{Если считать, что}$$

уравнение параболы удовлетворительно представляет контур контактной поверхности, то проекция площади на плоскость прокатки

определяется выражением $F_k = \frac{2}{3} b \cdot l$, что дает

возможность определить среднее контактное давление $p = P/F_k$, представимое в безразмерной форме как коэффициент напряженного состояния $n_\sigma = p/\sigma_s$, показанный на рис.3 в зависимости от вытяжки λ , относительного диаметра валка A и коэффициента трения Ψ . Кривые построены для случая прокатки свинцовых полос и свидетельствуют об удовлетворительном приближении к опытным данным (при $\Psi \approx 0,6$ и $A = 6,5$).

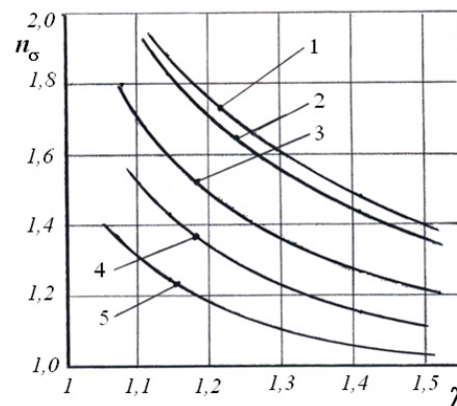


Рис. 3. Коэффициент напряженного состояния при прокатке по схеме круг-квадрат:

1 - $A=6,5$, $\Psi=0,8$; 2 - $A=10,4$, $\Psi=0,6$; 3 - $A=6,5$, $\Psi=0,6$;

4 - $A=4,8$, $\Psi=0,6$; 5 - $A=4,8$, $\Psi=0,4$

Определение положения и формы критической линии на контактной поверхности позволяет найти суммарный крутящий момент, создаваемый поперечной составляющей сил трения в зоне обжатия

$$M_k = \sqrt{\frac{2}{3}} \psi \sigma_s \left(\int_{0-y_k}^{x_1 y_k} h_x dy dx + \int_{x_1 y_f}^{l y_k} h_x dy dx - \int_{x_1-y_k}^{l y_f} h_x dy dx \right),$$

где $h_x = a + 2\bar{R}(1 - \cos \alpha)$;

$$\alpha = \arcsin \frac{l-x}{\bar{R}}.$$

Возникающий крутящий момент либо уравновешен защемлением предыдущей прокатной клетью входящей части полосы, либо скручивает заготовку в зоне обжатия.

Упрощенная описанная аналитическая модель очага деформации при прокатке на конических валках по схеме круг-квадрат не позволяет определить реальные углы скручивания полосы в зоне обжатия. Экспериментально же эти углы определяются просто и достаточно точно методом торцевых рисков, нанесенных на образцы заданной длины. Вытяжка варьируется изменением исходного диаметра полос. Методом риска замерялся удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия ϕ , а по развороту граней прокатанной полосы замерялся остаточный угол скручивания γ , также приводимый к единице длины зоны обжатия. Остаточное скручивание появляется всегда при отсутствии заневоливания выходящего конца полосы. Момент заневоливания переднего конца полосы определяется выражением [4]: $M = 0,2\tau_{s1}a^3$, где τ_{s1} - сопротивление сдвиговой деформации металла на выходе из валков.

В случае заневоливания переднего конца полосы угол скручивания в зоне обжатия представляет сумму $\phi = \phi + \gamma$. Рост γ при уменьшении обжатия объясняется смятием контактной зоны при ее малой ширине

$$b = \sqrt{d_1^2 - a^2} \text{ под действием возникающего в}$$

очаге деформации крутящего момента M_k . Хотя угол остаточного скручивания сравнительно мал, особенно в диапазоне практически приемлемых вытяжек, его следует учитывать при установке проводковых устройств последующих клетей непрерывной группы. В случае применения квадратного калибра в качестве чистового выводные проводки должны быть рассчитаны на возможность раскручивания профиля с учетом упругого последействия, величина которого зависит от расстояния между плоскостями осей валков клетки и роликов раскручивающей проводки.

Аналитически удалось удовлетворительно описать функцию ϕ полного угла скручивания полосы в зоне обжатия и добиться приемлемого для практики совпадения с опытными данными с

помощью достаточно искусственного приема условного разворота и смещения критической линии контактной поверхности до обнуления крутящего момента, то есть для удовлетворения равенству

$$\int_{0-y_k}^{x_1 y_k} h_x dy dx + \int_{x_1 y_f}^{l y_k} h_x dy dx = \int_{x_1-y_k}^{l y_f} h_x dy dx.$$

Результаты расчета удельного угла скручивания ϕ в зависимости от вытяжки и относительного диаметра валков представлены на рис.4.

ϕ , град/мм

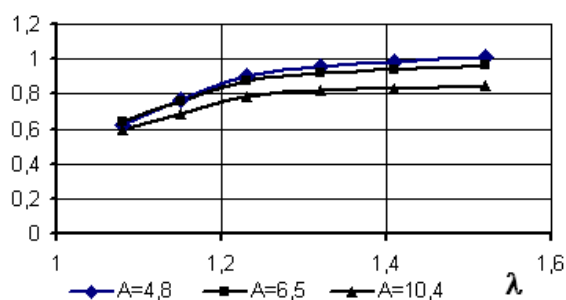


Рис. 4. Удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия

Располагая данными по величине удельного угла скручивания, легко определить угол скручивания профиля длиной L после прокатного прохода с вытяжкой λ

$$\phi_{\pi} = \phi \cdot L \cdot \lambda, \text{ град; } L - \text{мм.}$$

При этом случае деформация сдвига составит

$$\text{величину } \gamma_{\pi} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\phi_{\pi} d_{\text{ок}}}{L}, \text{ где } d_{\text{ок}} - \text{диаметр}$$

окружности, вписанной в контур поперечного сечения профиля.

Выводы

Сортовая прокатка по схеме круг-квадрат-круг в четырехвалковых калибрах конических валков – принципиально новый способ деформации с кручением, при котором возможно формирование спиральной текстуры проката, либо снижение контактных давлений благодаря дополнительным тангенциальным касательным напряжениям в очаге деформации.

Предложена упрощенная методика расчета основных кинематических и энергосиловых параметров прокатки по схеме круг-квадрат. Объем статьи не позволяет в полной мере провести сопоставление опытных и расчетных данных и вынуждает ограничиться декларацией не только качественной, но и количественной близости закономерностей, установленных с помощью показанной модели и при экспериментальном исследовании горячей прокатки.

Библиографический список

1. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием //Л.А.Барков, В.Н.Выдрин, В.В.Пастухов и др. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1988. 304 с.
2. Буркин С.П. Логинов Ю.Н., Шимов В.В. Технологические особенности применения гидропривода рабочих валков чистовых и калибровочных прокатных блоков //Труды второго Конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 1998. С.321-331.
3. Патент РФ №2087220, В21 В35/00. Прокатная клеть /Заяв. №94032651/02 от 06.09.94, авторы Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Шимов В.В. и др. – Оpubл. 20.08.97. БИ №23.
4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. 616 с.